

# Nouveaux traitements physiques de conservation des aliments : revue bibliographique

## 1<sup>ère</sup> partie : les champs électriques et magnétiques pulsés

B. PETIT, M. RITZ\* et M. FEDERIGHI

École Nationale Vétérinaire de Nantes, UMR 1014 Hygiène des Aliments INRA/ENVN, B.P. 40706, F-44307 Nantes

### RÉSUMÉ

Cet article propose une synthèse bibliographique sur deux nouveaux procédés physiques de préservation des aliments. Les aspects physiques et biologiques de ces traitements sont développés, principalement les effets sur les composants des aliments et sur les micro-organismes présents. Pour terminer, cet article aborde les utilisations potentielles de ces deux types de traitements dans l'industrie agro-alimentaire.

**MOTS CLÉS :** champs électriques - champs magnétiques - qualité - micro-organismes - applications potentielles.

### SUMMARY

**New physical food preservation treatments : an overview. First part : electric and magnetic fields.** By B. PETIT, M. RITZ and M. FEDERIGHI.

This review proposes an overview of some new physical food preservation treatments. In a first part electric and magnetic fields are described. Physical and biological aspects of the treatments are taken into consideration, principally effects on food components and on microorganisms. At last, before a conclusion, potential uses for both treatment in food industry are evocated.

**KEY-WORDS :** electric fields - magnetic fields - quality - micro-organisms - potential uses.

## Les champs électriques pulsés

Les champs électriques pulsés sont depuis longtemps utilisés en génie génétique, pour l'hybridation cellulaire et l'électrofusion [20]. Il faut attendre 1960, et le projet Doevenspeck, pour que son effet destructeur sur les micro-organismes soit exploré [23]. SALE et HAMILTON furent les premiers, en 1967, à étudier l'effet bactéricide des champs électriques pulsés [30].

### A) ASPECTS PHYSIQUES

#### 1) Principe

Le procédé des champs électriques pulsés, appliqué au domaine alimentaire, consiste à soumettre les aliments à des champs électriques de très forte intensité (5 à 55 kV/cm), de manière répétée (pulsé), pendant des temps très courts (de

l'ordre de la microseconde), en vue de détruire les micro-organismes qu'ils contiennent.

#### 2) Installations à champs électriques pulsés

##### a) Éléments généraux

Pour soumettre un aliment à un champ électrique pulsé il faut disposer d'une installation électrique qui doit comporter les éléments suivants [3] :

- un générateur à haute tension qui fournit l'énergie électrique à la tension désirée,
- plusieurs condensateurs, qui emmagasinent temporairement l'énergie électrique,
- un commutateur qui permet la décharge de l'énergie stockée,
- une chambre de traitement comportant deux électrodes, entre lesquelles sont disposés les aliments à traiter.

### b) La chambre de traitement

C'est l'élément fondamental de l'installation puisque c'est à l'intérieur de celle-ci qu'auront lieu les impulsions électriques au travers de l'aliment à traiter. On peut rencontrer deux grands types de chambre : statique et dynamique. Les chambres statiques, où seul un volume donné peut être traité à la fois, ne concernent que les applications expérimentales. Les chambres dynamiques, elles, permettent un traitement en continu, en accord avec les exigences d'une application industrielle. Actuellement, deux types de chambre prédominent [20] :

- les chambres à plaques parallèles, consistant en deux électrodes discales, percées d'un trou central permettant la circulation des aliments [35] ;
- les chambres coaxiales, les électrodes étant deux cylindres coaxiaux.

La figure 1 montre quelques exemples de types de chambres.

### c) L'impulsion électrique

A la fermeture du commutateur, les condensateurs se déchargent dans la chambre de traitement donnant naissance à une impulsion électrique au travers de l'aliment. La durée de l'impulsion varie de moins de une microseconde, à dix microsecondes.

Elle peut être monopolaire à décroissance exponentielle ou à forme carrée, ou bien bipolaire (figure 2). Les impulsions à forme carrée ont l'avantage d'appliquer le champ électrique à la tension voulue pendant la presque totalité de la durée de l'impulsion [3], et de diminuer l'élévation de température [6]. Les impulsions alternatives réduisent les dépôts électrolytiques sur les électrodes [35].

## 3) Comportement des aliments dans un champ électrique pulsé

### a) Caractéristiques électriques des aliments

Les aliments soumis à un champ électrique, ont des caractéristiques qui leur sont propres, et qui doivent être prises en compte afin de développer un procédé de pasteurisation de ces aliments.

La résistivité des aliments est très variable, elle varie de  $0,4 \Omega \cdot m^{-1}$ , pour les aliments à forte teneur en sels et en eau, à plus de  $100 \Omega \cdot m^{-1}$ , pour les matières grasses et les huiles [3].

Beaucoup d'aliments ont une structure hétérogène, de sorte que leurs caractéristiques électriques varient, et donc leur modélisation en tant que composant électrique peut présenter des difficultés. La conception des installations à champs électriques pulsés doit prendre en compte ces caractéristiques électriques, selon l'usage pour lequel elles sont destinées.

Un phénomène particulier peut se produire, lorsque l'on soumet un aliment à un champ électrique pulsé : c'est le claquage diélectrique. Il résulte de la brutale modification des propriétés conductrices d'un matériau sous l'effet d'un champ électrique intense, et se matérialise sous la forme d'une étincelle. Il est, là aussi, nécessaire de contrôler ce phénomène.

### b) Effets sur les constituants alimentaires

Peu d'études ont porté sur l'effet des champs électriques pulsés sur les constituants alimentaires.

Des molécules chargées comme les protéines, les polysaccharides, certains lipides ou des molécules porteuses des liaisons éthyléniques pourraient subir des modifications chimiques, sous l'effet de champs électriques [4].

JEANTET et coll. (1999) ont étudié l'effet des champs électriques pulsés sur le blanc d'oeuf, avec des traitements de 20 à 35 kV/cm, à des températures comprises entre 4 et 30°C. Ils constatent que l'élévation de l'hydrophobicité n'est que de 1 %, pour un traitement assurant 6 réductions décimales, alors que pour un traitement thermique ayant la même efficacité, cette élévation est de 58 %. La fluorescence des échantillons, observée après les traitements thermiques, ne se

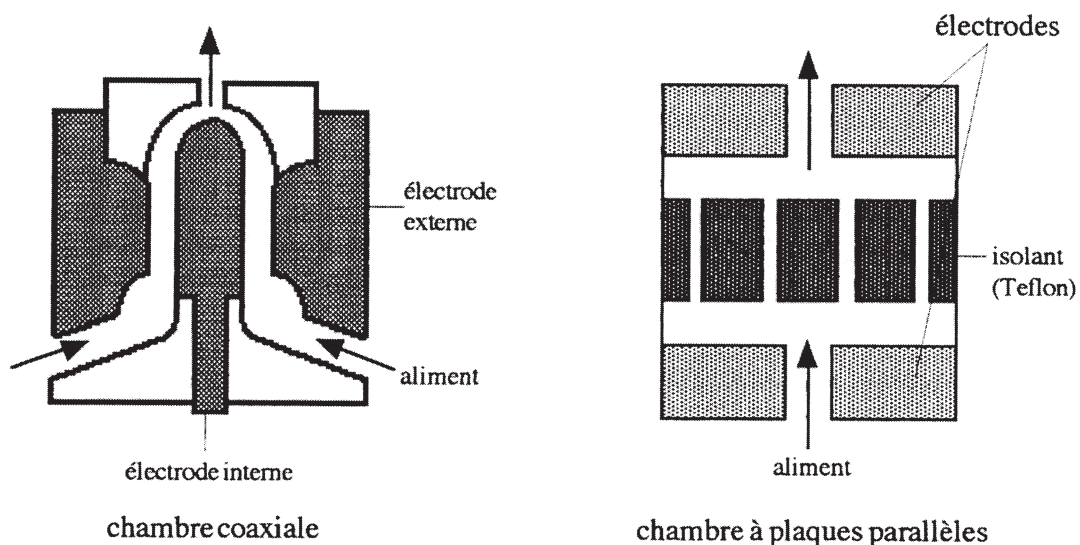


FIGURE 1. — Dessins de chambres de traitement [20].

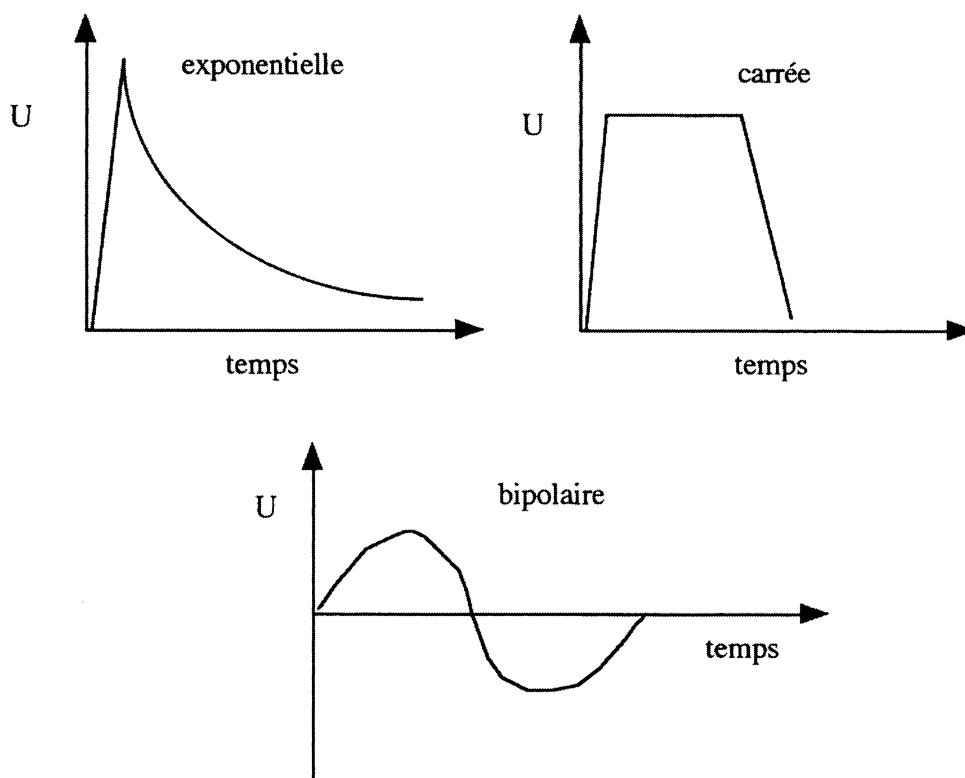


FIGURE 2. — Impulsions électriques.

retrouve pas sur les échantillons traités par les champs électriques pulsés. Ils concluent que les champs électriques pulsés ne modifient pas, de manière significative, la structure des protéines du blanc d'oeuf [19].

GRAHL et MARKL (1996) rapportent que les champs électriques pulsés n'ont qu'un effet très faible voire négligeable, sur les protéines et les vitamines. Cependant, dans une étude citée par SITZMANN (1995), il est montré qu'il est possible d'inactiver la lipase, avec un champ de 21,5 kV/cm, à 40°C, pour une énergie de 200 kJ, mais que la phosphatase alcaline et les lactoglobulines ne le sont pas [32]. Alors que BARBOSA-CANOVAS et coll. (1997), ont montré que la lipase et l'amylase ne sont pas inhibées par un champ électrique de 30 kV/cm [1].

VEGA-MERCADO et coll. (1996) inactivent la protéase de *Pseudomonas fluorescens* M3/6 de 80 %, après 20 impulsions, à la fréquence de 0,25 Hz, d'un champ de 18 kV/cm, en milieu modèle, et de 60 %, après 98 impulsions, à la fréquence de 2 Hz, et pour 14 kV/cm, dans du lait écrémé [33].

CASTRO (1994) rapporte qu'un traitement de 70 impulsions à 18,8 kV/cm, diminue l'activité enzymatique de la phosphatase alcaline du lait de 60 % [8].

En tout état de cause, il est nécessaire de multiplier les études sur l'effet des champs électriques pulsés sur les constituants des aliments, afin d'établir quelles sont les conséquences nutritionnelles et toxiques précises que pourrait induire un tel traitement.

#### c) modifications des qualités organoleptiques des aliments

QIN et coll. (1995) ont effectué des analyses sensorielles sur du jus de pomme, du lait écrémé, de l'oeuf entier liquide

et de la soupe de pois, après un traitement par champs électriques pulsés (35-50 kV/cm, 10 à 32 impulsions de 2  $\mu$ s, 8 à 22°C). Aucune différence n'a été constatée par un jury, entre les produits traités et les mêmes produits pasteurisés par la chaleur, sauf pour le jus de pomme qui a été jugé meilleur. Des modifications de la couleur et de la viscosité de l'oeuf entier liquide ont été constatées [27]. GRAHL et MARKL (1996) rapportent des résultats similaires [13].

JIA et coll. (1996) ont étudié les composés aromatiques du jus d'orange soumis à un traitement de 35 kV/cm, pendant 200 ms. Il apparaît que 87 % des composés aromatiques ont été préservés, 15 % du limonène et 26 % de l'éthyl-butyrates ont été perdus, alors qu'un traitement thermique (91°C, 30 s), réduit ces teneurs respectivement de 60 et 82 % [21].

## B) EFFETS DES CHAMPS ÉLECTRIQUES PULSÉS SUR LES MICRO-ORGANISMES

### 1) Mode d'action des champs électriques pulsés

#### a) modèle électromécanique

L'exposition d'une cellule biologique à un champ électrique pulsé suffisamment élevé, conduit à un phénomène de perméabilisation membranaire. Une rupture locale se produit, elle est réversible si l'intensité du champ et le temps d'exposition restent modérés. Ce phénomène, appelé électroporation, est mis à profit en génie génétique pour fusionner deux cellules ou pour faire pénétrer un brin d'ADN dans une cellule. Si ces valeurs augmentent fortement, la rupture membranaire devient irréversible. Le phénomène de rupture membranaire n'est pas totalement connu à ce jour, la théorie de

ZIMMERMANN semble être la plus acceptée par la communauté scientifique [22]. Dans cette théorie la membrane peut être considérée comme un condensateur. Des charges opposées existent de part et d'autre de la membrane à l'état naturel, ce qui induit un potentiel transmembranaire initial. L'exposition de la membrane à un champ électrique entraîne une accumulation des charges en surface de la membrane, ce qui augmente le potentiel transmembranaire. L'accumulation des charges, de signe opposé, provoque une compression de la membrane et donc son amincissement, qui à son tour augmente l'attraction entre les deux faces. A un moment donné, une rupture localisée de la membrane a lieu : il y a formation de pores. Le potentiel transmembranaire est alors appelé potentiel de rupture, sa valeur est proche de 1V [8, 22]. Il correspond à un champ électrique de rupture ( $E_r$ ). Ce potentiel correspond à la somme du potentiel initial et du potentiel induit.

Lorsque la valeur du champ électrique est nettement supérieure au champ électrique de rupture, la formation des pores devient irréversible.

Quelle que soit la théorie retenue, toutes s'accordent à dire que la formation de pores membranaires irréversibles est à l'origine, tout du moins en partie, de la mort cellulaire.

#### b) Modifications morphologiques

Pour *Escherichia coli*, l'observation en microscopie à transmission révèle une augmentation de la distance entre les membranes cellulaires internes et externes, et l'apparition d'indentations sur celle-ci, après un traitement de 64 impulsions de 60 kV/cm, à 13°C [1].

CALDERON-MIRANDA et coll. (1999) ont observé *Listeria innocua* dans du lait écrémé, après un traitement de

30 kV/cm. Ils observent des hétérogénéités dans la paroi, une agrégation du contenu cytoplasmique, une rupture de la membrane et de la paroi, ainsi qu'une fuite du cytoplasme. La formation des pores membranaires est observée à 40 kV/cm ; à 50 kV/cm, les cellules s'allongent [5].

En ce qui concerne les levures, les traitements par champs électriques pulsés entraînent la formation de bourgeons et l'apparition d'une surface rugueuse. Les ribosomes sont désintégrés, la membrane nucléaire est détruite, ainsi que la membrane plasmique, une fuite du contenu cytoplasmique est constatée [14]. HARRISON et coll. (1997) concluent que les perturbations cytoplasmiques observées suggèrent, pour les levures tout du moins, un autre mode d'inactivation que l'électroporation habituellement retenue [14].

#### 2) Inactivation microbienne et facteurs de variation

De nombreuses études ont été effectuées sur l'inactivation microbienne par les champs électriques pulsés. Il apparaît clairement qu'il est possible de détruire complètement ou partiellement les micro-organismes des aliments (tableau I).

JAYARAM et coll. (1992) obtiennent 9 réductions décimales de la population de *Lactobacillus brevis*, après un traitement à 25 kV/cm, à 60°C, dans un tampon phosphate [18].

ZHANG et coll. (1994) ont montré qu'un traitement à 40 kV/cm, pour une température inférieure à 25°C, diminuait les populations de *Escherichia coli* et *Saccharomyces cerevisiae* de 3 à 4 cycles logarithmiques, dans un milieu gélosé et du jus de pomme, respectivement [36].

*Bacillus subtilis* et *Lactobacillus delbrueckii* voient leurs populations diminuer de 4 à 5 cycles logarithmiques, dans l'ultrafiltrat artificiel de lait, après 40 ou 50 impulsions à 16 kV/cm, à température ambiante [24].

Micro-organisme	Milieu	Champ électrique (kV/cm)	Impulsions	Température du milieu (°C)	Volume de la chambre de traitement	Réductions décimales obtenues
<i>Sc. cerevisiae</i>	jus de pomme	12	20 de 2,77 µs	<30	25 ml (statique)	4
	jus de pomme	35	10 de 2,5 µs	22-34	30 ml (dynamique)	> 6
	jus d'orange	6,7	5 de 20 µs	45-50	25 ml (statique)	5
	yaourt	25-38	20 de 100 µs	63	175 ml (statique)	2
<i>Salmonella dublin</i>	lait écrémé	28	100 de 1 µs	<30	NP* (dynamique)	2,5 à >5
<i>Escherichia coli</i>	SMUF**	25	NP*	<25	26 ml (statique)	2,8
	SMUF**	70	80 de 2 µs	20	14 ml (statique)	9
	œuf liquide	26	2 µs (nb NP*)	<37	12 ml (NP*)	5 à 6
<i>Bacillus subtilis</i>	soupe de pois	33	30 de 2 µs	<55	29 ml (dynamique)	5
<i>Lactobacillus brevis</i>	lait	22	20 de 20 µs	45-50	25 ml (statique)	4,6
<i>S. aureus</i>	SMUF**	60	40 (durée NP*)	<40	29 ml (dynamique)	>5

\* NP : Non Précisé ; \*\* SMUF : Synthetic Milk UltraFiltrate

TABLEAU I. — Effets des champs électriques pulsés sur différents micro-organismes [4].

### a) Influence des caractéristiques propres aux micro-organismes

De nombreux auteurs s'accordent à dire que la sensibilité des micro-organismes dépend de leur genre. Pour SALE et HAMILTON (1967), les levures sont plus sensibles que les formes végétatives des bactéries, alors que pour HULSHEGER et coll. (1983), les bactéries à Gram positif et les levures, sont moins sensibles que les bactéries à Gram négatif [30, 17]. POTHAKAMURY et coll. (1995) rapportent une sensibilité supérieure des bactéries à Gram négatif et des levures [24].

L'état physiologique dans lequel se trouvent les micro-organismes entraîne une différence de sensibilité aux champs électriques pulsés. Les cellules en phase de croissance logarithmique sont plus sensibles que les cellules en phase stationnaire. POTHAKAMURY et coll. (1996) l'ont constaté sur *Escherichia coli*, 2 réductions décimales sont obtenues pour les premières, alors que le même traitement (4 impulsions de 36 kV/cm, à 7°C), diminue de moins de 90 % la population initiale, pour les secondes [25].

WOUTERS et coll. (1999) obtiennent le même type de résultats sur *Listeria innocua* (figure 3) [34]. Il semble que la zone de séparation entre la cellule mère et la cellule fille (septum) offre une sensibilité supérieure aux champs électriques pulsés [7]. JAYARAM et coll. (1992) constatent que le taux d'inactivation de *Lactobacillus brevis* augmente si le nombre de germes augmente, au contraire de ce qu'observent JEANTET et coll. (1999) sur *Salmonella enteritidis* [18, 19].

Les spores bactériennes semblent plus résistantes que les formes végétatives [22]. Les spores de *Bacillus cereus* et *Bacillus polymyxa* résistent à un champ de 30 kV/cm [1]. Toutefois, il apparaît possible qu'un temps d'application important puisse inactiver les spores de *Bacillus subtilis*, un effet bactéricide indirect de produits d'électrolyse serait à l'origine de cette inactivation [32].

Les champs électriques n'induisent pas la germination des spores [22], mais ils sont actifs sur les formes végétatives obtenues grâce à l'action d'autres procédés. Ainsi, SIMPSON et coll. (1995) réduisent la population sporale de *Bacillus subtilis* de 2 à 4 cycles logarithmiques, en associant successivement un traitement thermique (80°C, 10 min), un

traitement enzymatique (addition de lysozyme), et un traitement électrique (80 impulsions de 2  $\mu$ s, à 60 kV/cm et à 60°C) [31].

### b) Influence des caractéristiques du milieu

Les caractéristiques physico-chimiques du milieu influent sur l'efficacité des champs électriques pulsés.

WOUTERS et coll. (1999) constatent qu'une augmentation de la conductivité du milieu et qu'un pH acide, diminuent l'inactivation de *Listeria innocua* [34]. Dans une autre étude la même constatation est faite pour un pH bas vis-à-vis de *Salmonella enteritidis* [19].

Un traitement de 2 impulsions, à 30 kV/cm, entraîne une réduction de 6 log de la population de *Byssoschlamys fulva*, dans du jus d'ailles, mais de moins de 1 log dans du jus de tomate [28]. JAYARAM et coll. (1992) considèrent que l'augmentation de la conductivité du milieu réduit la largeur de l'impulsion et donc le taux d'inactivation microbienne [18].

Il apparaît donc primordial de compléter les connaissances sur l'influence des caractéristiques physico-chimiques de l'aliment sur l'efficacité des traitements par champs électriques pulsés.

### c) Influence des paramètres du traitement

Plusieurs paramètres sont susceptibles de faire varier l'efficacité d'un traitement par les champs électriques pulsés. Les plus importants sont : l'intensité du champ électrique, la durée du traitement, la forme des impulsions et la température.

#### a) L'intensité du champ

Le taux d'inactivation augmente si l'intensité du champ électrique augmente (figure 4).

Les populations de *Escherichia coli* 8739 et *Escherichia coli* O157:H7 diminuent d'un facteur 2 log et 2,5 log respectivement, pour une intensité de 22 kV/cm ; alors que pour une intensité de 30 kV/cm elle est de 4 log environ [12].

WOUTERS et coll. (1999) constatent le même effet synergique jusqu'à une valeur seuil de 30 kV/cm, au-delà de laquelle l'augmentation de l'intensité du champ n'entraîne plus d'élévation du taux d'inactivation [34].

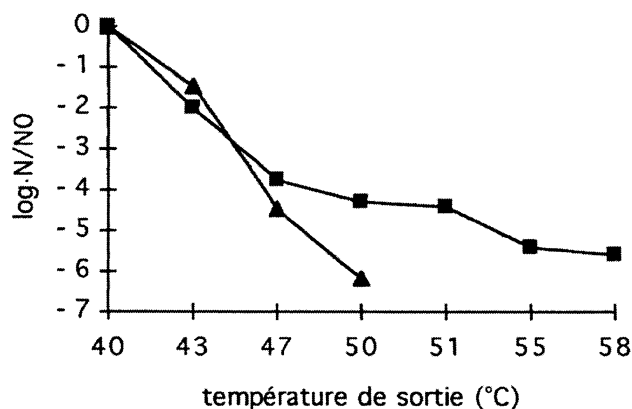


FIGURE 3. — Inactivation de *Listeria innocua* (30 kV/cm) en phases de croissance (▲) et stationnaire (■) [34].

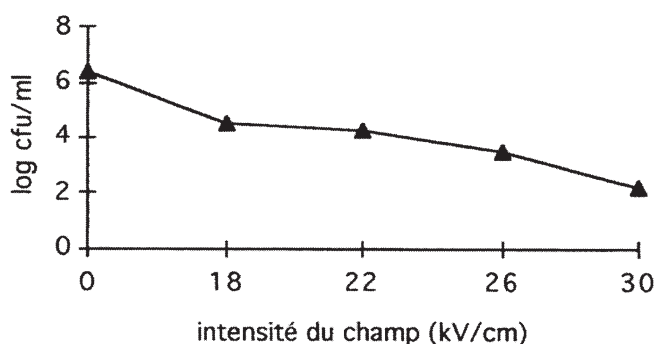


FIGURE 4. — Inactivation de *Escherichia coli* en fonction de l'intensité du champ électrique [12].



REINA et coll. (1998) ont étudié l'action des champs électriques pulsés sur l'inactivation de *Listeria monocytogenes* dans du lait entier, à 25°C. Ils ne constatent pas de différence entre 25 et 35 kV/cm, si la durée du traitement est inférieure à 100 microsecondes. Par contre, pour des durées plus longues (300 et 600 microsecondes), une intensité de 35 kV/cm se révèle plus efficace [29].

#### b) la durée du traitement

La durée du traitement est égale au produit du nombre d'impulsions et de la durée de chaque impulsion. L'efficacité d'un traitement par les champs électriques pulsés augmente si la durée du traitement augmente (figure 5).

*Listeria monocytogenes* voit sa population réduite de 0,5 log pour un traitement de 100 microsecondes, à 35 kV/cm, à 25°C, et de 2,5 log pour une durée de 600 microsecondes [29].

JAYARAM et coll. (1992) obtiennent 3 réductions décimales, de la population de *Lactobacillus brevis*, pour un traitement à 25 kV/cm, à 24°C et pour une durée de 2,5 millisecondes, mais pour le même traitement pendant 15 millisecondes, le taux d'inactivation est de 8 réductions décimales [18].

WOUTERS et coll. (1999) ont comparé les taux d'inactivation de *Listeria innocua* en fonction du nombre d'impulsions de durée constante : plus le nombre d'impulsions est élevé, plus l'efficacité du traitement est grande [34].

Certains auteurs proposent des équations pour calculer le taux de survie d'un micro-organisme, en fonction de l'intensité du champ électrique et de la durée du traitement.

HULSHEGER et coll. (1981) considèrent l'équation suivante comme valable :

$$N/N_0 = (t/t_c)^{-(E-E_c/k)}$$

où N est le nombre de micro-organismes survivants,  $N_0$  le nombre initial de micro-organismes, t la durée du traitement, E l'intensité du champ électrique,  $t_c$  et  $E_c$  les valeurs extrapolées de t et E pour 100 % de survie, k une constante. Cette équation n'est valable que pour  $E > E_c$ ,  $t > t_c$  et pour les formes végétatives des bactéries [16].

#### c) les caractéristiques des impulsions

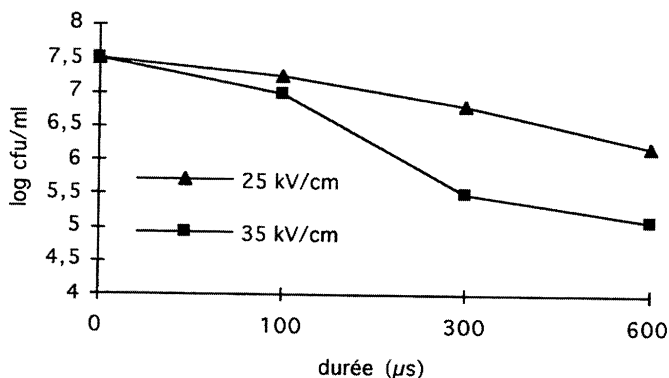


FIGURE 5. — Influence de la durée du traitement sur l'inactivation de *Listeria monocytogenes* [29].

POTHAKAMURY et coll. (1996) ont montré que l'inactivation de *Escherichia coli*, dans de l'ultrafiltrat artificiel de lait, était plus efficace avec des impulsions carrées qu'avec des impulsions à décroissance exponentielle [25]. ZHANG et coll. (1994) considèrent que 91 % de l'énergie des impulsions carrées se situent au dessus de la valeur du champ électrique critique, alors que 64 % le sont dans le cas des impulsions à décroissance exponentielle, ce qui serait à l'origine de la différence d'efficacité entre les deux types d'impulsions [36]. L'utilisation d'impulsions de forme carrée peut donc limiter l'échauffement lors du traitement, en diminuant l'apport énergétique global [6].

Les impulsions bipolaires sont plus efficaces que les impulsions monopolaires, l'inversion brutale de l'orientation du champ serait à l'origine d'une fatigue accrue de la structure membranaire [20].

La longueur de l'impulsion semble influencer l'efficacité du traitement dans certaines conditions. Ainsi WOUTERS et coll. (1999) constatent que pour des champs de 28 kV/cm, l'augmentation de la longueur de l'impulsion augmente l'inactivation de *Listeria innocua* à 55°C (3,9 log pour 2 µs, 5,2 log pour 3 et 3,9 µs), alors que pour un champ de 36 kV/cm ; 5 log sont obtenus et ce, quelle que soit la longueur de l'impulsion réalisée à 45°C [34].

#### d) température du traitement

L'effet bénéfique d'une augmentation de la température pendant le traitement, sur l'inactivation microbienne est rapporté par de nombreux auteurs [18, 19, 20, 29, 34].

Toutefois, il faut noter que le traitement par les champs électriques pulsés entraîne une élévation de température. WOUTERS et coll. (1999) ont donc comparé l'efficacité du traitement en fonction de l'énergie appliquée à l'aliment à différentes températures (figure 6). On constate que pour une énergie similaire l'inactivation est plus importante à température initiale élevée [34].

La température interviendrait en diminuant le potentiel transmembranaire critique [25, 29, 35], ou en diminuant l'épaisseur de la bicouche lipidique [18].

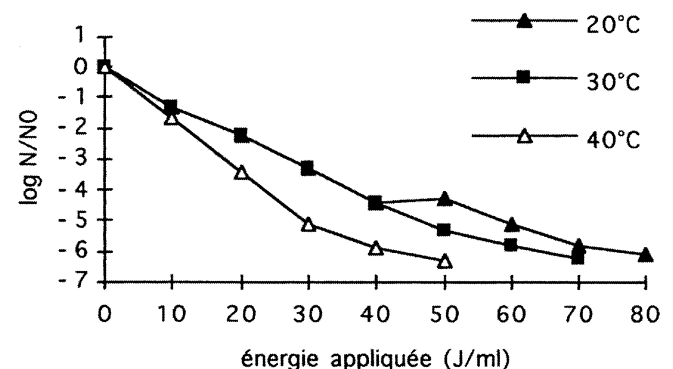


FIGURE 6. — Effet de la température sur l'inactivation de *Listeria innocua* [34].

## C) APPLICATIONS ALIMENTAIRES POTENTIELLES

Actuellement aucune commercialisation de denrées traitées par les champs électriques pulsés n'est relatée. Toutefois, dès les années 1930, une technique de pasteurisation du lait par champs électriques, utilisant un champ alternatif de 220 Volts, permettait la commercialisation de plus de 200 millions de litres jusque dans les années 1960, date à laquelle le procédé fut abandonné [7].

L'application la plus étudiée actuellement par les industriels concerne la pasteurisation des jus de fruits à des températures modérées. Ainsi QIN et coll. (1995) ont montré qu'un traitement consistant en l'application de 16 impulsions, de 2 microsecondes, à 50 kV/cm, autorisait une durée de conservation réfrigérée du jus de pomme frais pendant 3 semaines, la température pendant le traitement n'excédant pas 45°C, et les qualités organoleptiques du produit étant conservées [27].

Le lait peut également être traité par les champs électriques pulsés, en vue d'augmenter sa durée de conservation. QIN et coll. (1995) ont obtenu une durée de vie de 14 jours, en conservant le produit à température réfrigérée, sans perte des qualités organoleptiques [27]. Ce type de traitement pourrait permettre également d'inactiver certains micro-organismes pathogènes, tels que *Listeria monocytogenes* [29]. Le même objectif peut être atteint avec *Salmonella enteritidis* dans les ovoproduits [19].

Les applications alimentaires potentielles sont présentées dans le tableau II.

Pure Pulse Technologies (filiale de Maxwell Lab., San Diego, Californie) possède plusieurs brevets américains concernant le traitement de différentes denrées alimentaires pompables (lait, œufs liquides, jus de fruit) [4]. Pure Pulse Technologies annonce qu'un traitement à 55°C de lait entier a permis l'obtention d'une réduction microbienne supérieure à celle obtenue par un traitement thermique seul, et que le taux d'inactivation de *Listeria innocua*, était supérieur à 6 log, sans changement des qualités organoleptiques [11].

Pure Pulse Technologies annonce que le procédé (Cool Pure™) a été vendu à une société japonaise, Nissin Electric, en vue de la commercialisation sur les linéaires japonais, de produits traités par les champs électriques pulsés.

Même si les produits pompables sont les plus concernés par un traitement par les champs électriques pulsés, en raison de la possibilité de leur traitement en mode continu, il n'est pas exclu de pouvoir traiter des produits solides d'épaisseur modérée, selon un mode discontinu [4].

Le manque de données sur la toxicité des denrées alimentaires traitées par les champs électriques pulsés, représente toutefois un frein au développement d'un tel procédé, tout du moins en ce qui concerne l'Union Européenne, la Food and Drug Administration américaine, ayant donné une réponse de non-objection, à une demande de Pure Pulse Technologies pour le traitement de denrées alimentaires [11]. L'impact économique d'un tel procédé a été évalué aux Etats-Unis à moins de 2,5 centimes/litre (électricité, maintenance et amortissement de l'installation), sur la base de 100 J/litre produit [11], soit trois fois moins que pour un procédé thermique [4], l'équipement étant estimé entre 2 et 3 millions de francs, pour un débit de 100 litres/heure [10].

## D) CONCLUSION

Les résultats obtenus avec le traitement des aliments par les champs électriques pulsés sont encourageants, même s'ils sont pour l'instant cantonnés à l'échelle du laboratoire. La rapidité de traitement permise par cette technique représente un atout majeur, quant au devenir de ce procédé appliqué aux produits pompables ; il en est de même pour la consommation énergétique globale, qui n'est que de 10 % de celle d'un procédé thermique ultra-court. Toutefois le coût de l'équipement constitue un frein à l'intensification des études sur les conséquences toxicologiques des champs électriques pulsés, nécessaires pour une utilisation industrielle.

Fluides alimentaires acides	Autres fluides alimentaires (moins acides)
Jus d'orange et d'autres agrumes	Œuf entier liquide
Jus de pomme	Blanc d'œuf liquide
Concentré de tomate, Ketchup	Potages ou purées de légumes
Purée de fruits	Lait écrémé ou entier
Sauce pour spaghetti avec morceaux de viande	Pâtes à tartiner, garnitures
Yaourts liquides avec ou sans morceaux de fruits	Sirops divers, miel
Confitures	Emulsions huile/eau
Boissons faiblement alcoolisés	Pulpes de poissons
Vins	Viande hachée

TABLEAU II. — Applications alimentaires potentielles des traitements par champs électriques pulsés [4].

# Les champs magnétiques pulsés

L'effet des champs magnétiques sur les organismes vivants a été mis en évidence au début du 20<sup>ème</sup> siècle, par l'observation de l'influence d'un champ magnétique sur le courant protoplasmique des algues [2]. Les champs magnétiques pulsés de haute intensité sont utilisés en industrie pour le magnétoformage de pièces métalliques. En utilisant ce type d'installation, pour le formage d'un matériau non conducteur, HOFMANN en 1985 a constaté qu'une grande partie des micro-organismes, présents à la surface de celui-ci, était inactivée [15].

## A) DÉFINITIONS

Le champ magnétique est la région dans laquelle un corps magnétique est capable de magnétiser un corps environnant. Trois paramètres caractérisent un champ magnétique :

- son flux, égal au nombre de lignes de force, son unité est le Weber (Wb),  $1 \text{ Wb} = 10^6$  lignes ;
- sa densité de flux, égale au nombre de lignes de force par unité de surface, son unité est le Tesla (T),  $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$  ;
- son intensité, égale à la force subie par un élément polarisé, dans le vide, soumis au champ magnétique, son unité est l'Ampère/mètre (A/m) [26].

On distingue généralement les champs statiques et les champs oscillants, dont la fréquence d'oscillation est exprimée en Hertz (Hz). De plus, un champ magnétique peut être homogène ou hétérogène.

Lorsqu'un corps présente les mêmes aptitudes à la magnétisation selon les trois axes orthogonaux, il est qualifié d'isotropique, et d'anisotropique, dans le cas contraire. Un atome de carbone est isotropique alors que deux atomes de carbone liés de façon covalente, sont anisotropiques.

Si l'intensité de la magnétisation induite dans un corps est inférieure à celle induite dans le vide, on parle de diamagnétisme; si elle est supérieure, on parle de paramagnétisme. Ainsi la majeure partie des composées organiques sont diamagnétiques, les radicaux libres et les éléments de transition sont paramagnétiques.

## B) EFFETS DES CHAMPS MAGNÉTIQUES SUR LES MICRO-ORGANISMES

### 1) Inactivation microbienne par les champs magnétiques pulsés à haute densité de flux

Les effets des champs magnétiques sur les micro-organismes sont aussi divers que les contextes expérimentaux à partir desquels ils ont été décrits. Le tableau III présente ces différents effets.

Parmi les différentes formes de champs, les champs magnétiques pulsés à haute densité de flux, laissent envisager des perspectives d'applications intéressantes, notamment en ce qui concerne leur aptitude à la décontamination des aliments [2, 9].

En effet HOFMANN (1985) a montré que des champs pulsés de 5 à 50 T, d'une fréquence de pulsation comprise entre 5 et 500 kHz, permettaient d'obtenir des réductions d'au moins 2 réductions décimales des populations étudiées dans différents aliments [15].

Micro-organisme	Type de champ	Intensité (T)	Fréquence de pulsation (Hz)	Nombre d'impulsions	Effets
Levure de vin	Hétérogène CMS	0,04			Inhibition de la croissance
	Homogène CMS	1,1			Aucun effet
<i>Staphylococcus aureus</i>	Hétérogène CMS	1,5			Taux de croissance augmenté entre 3 et 6 h et diminué entre 6 et 7 h
<i>Sc. cerevisiae</i>	Homogène CMS	0,46			Taux de reproduction réduit
<i>Escherichia coli</i>	CMS	0,3			Croissance stimulée
	CMO	0,015-0,03	0,05		Inactivation
<i>Bacillus subtilis</i>	CMS	0,015			Croissance inhibée
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	CMO	0,015-0,03	0,1-0,3		Croissance stimulée
<i>St. thermophilus</i> (lait)	CMO	12	6000	1	96,12% d'inactivation
<i>Sc. cerevisiae</i>	CMO	40	416 000	10	99,28% d'inactivation
Spores moisissures	CMO	7,5	8500	1	99,97% d'inactivation

TABLEAU III. — Effets des champs magnétiques sur les micro-organismes [15, 26].



Ainsi en soumettant du lait pasteurisé, inoculé avec *Streptococcus thermophilus*, à un champ magnétique pulsé de 12 T, la population passe de 25000 à 970 germes/ml, soit une réduction de 1,4 log après une impulsion unique. De même, après l'application de 10 impulsions d'un champ de 40 T, à une fréquence de 416 kHz, la population de *Saccharomyces sp.* passe de 3500 à 25 germes/ml, soit une réduction de 2,15 log. On obtient une réduction de 3,6 log sur *Saccharomyces sp.* dans du yaourt avec une impulsion d'un champ de 40 T, d'une fréquence de 416 kHz, et de 3,5 log sur des spores de moisissures dans des pâtons de pain cru.

## 2) Mode d'action

Plusieurs théories ont été proposées, mais à ce jour le mode d'action des champs magnétiques pulsés sur les micro-organismes n'est pas connu.

Lorsqu'un ion, de charge  $q$ , animé d'une vitesse  $v$ , est soumis à un champ magnétique  $B$ , il subit une force  $F$  donnée par la relation:

$$F = q(v.B)$$

Si  $v$  et  $B$  sont parallèles  $F$  est nulle, s'ils sont orthogonaux l'ion est animé d'un mouvement circulaire, pour les autres orientations il est animé d'un mouvement hélicoïdal.

La fréquence de révolution des ions est donnée par la formule :

$$v = q.B/2\pi m$$

où  $q$  est la charge et  $m$  la masse de l'ion.

On considère que lorsque  $v$  est égale à la fréquence du champ magnétique, l'énergie est transférée sélectivement aux ions, ce qui leur confère une vitesse supérieure et perturbe le métabolisme impliquant ces ions, dans la totalité de la cellule [26].

D'autres auteurs estiment que le champ magnétique crée des déplacements dans la position des ions au sein même de la membrane, pouvant ainsi ouvrir ou fermer des canaux membranaires, ou/et qu'il peut imprimer une force de torsion sur des dipôles membranaires, entraînant des ruptures localisées [2].

HOFMANN (1985) considère que les énergies libérées par les champs magnétiques pulsés pourraient entraîner des ruptures de liaisons covalentes de molécules de hauts poids moléculaires, telles que l'ADN, aboutissant à la mort de la cellule ou empêchant la multiplication cellulaire [15]. CAUBET (1999) rapporte des résultats en accord avec cette théorie, en observant que l'application des champs magnétiques pulsés sur une population de spores de *Penicillium cyclopium*, entraînait des modifications de l'aspect des colonies, mais que des populations de *Listeria innocua*, *Escherichia coli* et *Bacillus cereus* ne présentaient aucune modification après le même traitement [9].

## C) APPLICATIONS POTENTIELLES

Très peu d'études ont porté sur l'utilisation des champs magnétiques en vue de décontaminer les aliments. La seule source est un brevet américain. HOFMANN (1985) a en effet montré que l'utilisation de champs magnétiques pulsés de 5 à 50 Tesla, d'une fréquence de pulsation de 5 à 500 kHz, suffi-

rait à réduire de manière significative (1,4 à 3,6 log) le nombre de micro-organismes inoculés dans des aliments. Les aliments étaient placés dans un sac en plastique, lui-même introduit dans la bobine magnétique. La durée d'exposition totale, égale au produit de la durée d'une impulsion et du nombre d'impulsions, était comprise entre 25  $\mu$ s et 10 ms. Chaque impulsion était constituée de 10 oscillations. Au-delà, l'intensité du champ est réduite de manière trop importante, la réduction de l'intensité du champ étant approximativement égale à 10 % après chaque oscillation. L'augmentation de température constatée était au maximum de 5°C, et les qualités organoleptiques des aliments étaient inchangées.

L'utilisation de ce type de procédé étant possible au travers d'un emballage, une recontamination ultérieure est limitée. Toutefois aucun emballage métallique ne peut être traité, en raison de la déformation importante qu'il subirait [26].

## D) CONCLUSION

Les champs magnétiques pulsés sont capables d'inactiver les micro-organismes dans les aliments. Ils présentent plusieurs avantages technologiques : faible augmentation de température et peu d'altérations des qualités organoleptiques, possibilité de traitement au travers d'un emballage. Le ou les modes d'actions ne sont actuellement pas connus, et les conséquences toxicologiques et nutritionnelles pas suffisamment documentées. Aussi des études ultérieures sont nécessaires pour entrevoir clairement les possibilités d'utilisation des champs magnétiques pulsés pour le traitement des aliments.

## Bibliographie

1. — BARBOSA-CANOVAS G.V., POTHAKAMURY U.R., PALOU E. et SWANSON B.G. : Pulsed electric fields : effects and application. In BARBOSA-CANOVAS G.V., POTHAKAMURY U.R., PALOU E., SWANSON B.G (eds.) Non thermal preservation of foods, Marcel Dekker, New-York, 1998, 73-112.
2. — BARBOSA-CANOVAS G.V., POTHAKAMURY U.R., PALOU E. et SWANSON B.G. : Oscillating magnetic fields for food processing. In BARBOSA-CANOVAS G.V., POTHAKAMURY U.R., PALOU E., SWANSON B.G (eds.) Non thermal preservation of foods, Marcel Dekker, New-York, 1998, 113-138.
3. — BARSOTTI L., MERLE P. et CHEFTEL J.C. : Traitement des aliments par champs électriques pulsés : 1-Aspects physiques. *Sci. Alim.*, 1998, **18**, 583-601.
4. — BARSOTTI L. et CHEFTEL J.C. : Traitement des aliments par champs électriques pulsés : 2-Aspects biologiques. *Sci. Alim.*, 1999, **19**, 3-33.
5. — CALDERON-MIRANDA M.L., BARBOSA-CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : Transmission electron microscopy of *Listeria innocua* treated by pulsed electric fields and nisin in skimmed milk. *Int. J. Food Microbiol.*, 1999, **51**, 31-38.
6. — CAPLOT M. et COTE G. : Les technologies nécessaires aux machines de traitement par champs électriques pulsés, in ACTIA (ed.) La conservation de demain 2<sup>ème</sup> édition, Pessac, 13 et 14 Oct 1999, 1-13.
7. — CASTRO A.J., BARBOSA-CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : Microbial inactivation of foods by pulsed electric fields. *J. Food Process. Preserv.*, 1993, **17**, 47-73.
8. — CASTRO A.J. : Pulsed electric field modification of activity and denaturation of alkaline phosphatase. Ph. D. thesis, Washington State University, Pullman, Washington, 1994.
9. — CAUBET R. : Effets des champs magnétiques pulsés à haute densité de flux sur les micro-organismes, in ACTIA (ed.) La conservation de demain 2<sup>ème</sup> édition, Pessac, 13 et 14 Oct 1999, 14-19.

10. — COHEN MAUREL E. : Décontamination à froid, ça va pulser. *Process*, 1997, **1130**, 52-56.
11. — DUNN P. : Pulsed light and pulsed electric field for foods and eggs. *Poultry Sci.*, 1996, **75**, 1133-1136.
12. — EVRENDILEK G.A., ZHANG Q.H. et RICHTER E.R. : Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Escherichia coli* 8739 in apple juice by pulsed electric fields. *J. Food Protect.*, 1999, **62**, 793-796.
13. — GRAHL T. et MARKL H. : Killing of microorganisms by pulsed electric fields. *Appl. Microbiol. Technol.*, 1996, **45**, 148-157.
14. — HARRISON S.L., BARBOSA-CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : *Saccharomyces cerevisiae* structural changes induced by pulsed electric field treatment. *Food Sci. Technol.*, 1997, **30**, 236-240.
15. — HOFMANN G.A. : Deactivation of microorganisms by an oscillating magnetic field. US patent n° 4524079, 1985.
16. — HULSHEGER H., POTEL J. et NIEMANN E.G. : Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Radiat. Environ. Biophys.*, 1981, **20**, 53-65.
17. — HULSHEGER H., POTEL J. et NIEMANN E.G. : Electric fields effects on bacteria and yeast cells. *Radiat. Environ. Biophys.*, 1983, **22**, 149-162.
18. — JAYARAM S., CASTLE G.S.P. et MARGARITIS A. : Kinetics of sterilization of *Lactobacillus brevis* cells by the application of high voltage pulses. *Biotechnol. Bioeng.*, 1992, **40**, 1412-1420.
19. — JEANTET R., BARON F., NAU F., ROIGNANT M. et BRULE G. : High intensity pulsed electric fields applied to egg white : effect on *Salmonella enteritidis* inactivation and protein denaturation. *J. Food Protect.*, 1999, **62**, 1381-1386.
20. — JEYAMKONDAN S., JAYAS D.S. et HOLLEY R.A. : Pulsed electric field processing of foods : a review. *J. Food Protect.*, 1999, **62**, 1088-1096.
21. — JIA M., ZHANG Q.H. et MIN D.B. : Effect of pulsed electric field processing on orange juice flavor analyzed by dynamic headspace gas chromatography. (abstr.) Annual IFT Meeting, Institute of Food Technologists, 1996, June 23-26, New Orleans, Louisiana.
22. — KNORR D., GEULEN M., GRAHL T. et SITZMANN W. : Food application of high electric field pulses. *Trends Food Sci. Technol.*, 1994, **5**, 71-75.
23. — PAPILLON J. : Principes de base et applications industrielles des champs électriques pulsés en agro-alimentaire, in ACTIA (ed.) La conservation de demain 2<sup>ème</sup> édition, Pessac, 13 et 14 Oct 1999, 33-48.
24. — POTHAKAMURY U.R., MONSALVE GONZALEZ A., BARBOSA CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : High voltage pulsed electric field inactivation of *Bacillus subtilis* and *Lactobacillus delbrueckii*. *Rev. Esp. Cienc. Tecnol. Alim.*, 1995, **35**, 101-107.
25. — POTHAKAMURY U.R., VEGA H., ZHANG Q., BARBOSA-CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : Effect of growth stage and processing temperature on the inactivation of *E. coli* by pulsed electric fields. *J. Food Protect.*, 1996, **59**, 1167-1171.
26. — POTHAKAMURY U.R., BARBOSA-CANOVAS G.V., SWANSON B.G. : Magnetic-Field inactivation of microorganisms and generation of biological changes. *Food Technology*, 1993, **47**, 85-93.
27. — QIN B.L., POTHAKAMURY U.R., VEGA H., MARTIN O., BARBOSA-CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : Food pasteurization using high intensity pulsed electric fields. *Food Technology*, 1995, **12**, 55-60.
28. — RASO J., CALDERON M.L., GONGORA M., BARBOSA-CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : Inactivation of mold ascospores and conidiospores suspended in fruit juices by pulsed electric fields. *Food Sci. Technol.*, 1998, **31**, 668-672.
29. — REINA L.D., JIN Z.T., ZHANG Q.H. et YOUSEF A.E. : Inactivation of *Listeria monocytogenes* in milk by pulsed electric field. *J. Food Protect.*, 1998, **61**, 1203-1206.
30. — SALE A.J.H. et HAMILTON W.A. : Effect of high electric fields on microorganisms. I. Killing of bacteria and yeasts. *Biochem. Biophys. Acta*, 1967, **148**, 781-788.
31. — SIMPSON M.V., BARBOSA-CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : The combined inhibitory effect of lysozyme and high voltage pulsed electric fields on the growth of *Bacillus subtilis* spores. (abstr.) Annual IFT Meeting, Institute of Food Technologists, 1995, June 3-7, Anaheim, California.
32. — SITZMANN W. : High voltage pulse techniques for food preservation. In GOULD G.W. (ed.), New methods of food preservation, Blackie Academic & Professional, London, 1995, 236-252.
33. — VEGA-MERCADO H. : Inactivation of plasmin and a protease from *Pseudomonas fluorescens* M3/6 using pulsed electric fields. Ph. D. thesis, Washington State University, Pullman, Washington, 1996.
34. — WOUTERS P.C., DUTREUX N., SMELT J.P.P.M. et LELIEVELD H.L.M. : Effects of pulsed electric fields on inactivation kinetics of *Listeria innocua*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1999, **65**, 5364-5371.
35. — ZHANG Q., BARBOSA-CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *J. Food Eng.*, 1995, **25**, 261-281.
36. — ZHANG W., MONSALVE GONZALEZ A., BARBOSA CANOVAS G.V. et SWANSON B.G. : Inactivation of *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae* by pulsed electric fields under controlled temperature conditions. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 1994, **32**, 581-586.